



TITLE:

RCEM を用いた少量噴射ディーゼル噴霧の特性に関する研究

AUTHOR(S):

包, 智超; 堀部, 直人; 石山, 拓二

CITATION:

包, 智超 ...[et al]. RCEM を用いた少量噴射ディーゼル噴霧の特性に関する研究. 内燃機関シンポジウム講演論文集 2017, 28: 20178081.

ISSUE DATE:

2017-12

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/237698>

RIGHT:

© 2017 公益社団法人 自動車技術会 (Society of Automotive Engineers of Japan, Inc.); 発行元の許可を得て登録しています.

11 RCEM を用いた少量噴射ディーゼル噴霧の特性に関する研究*

包 智超¹⁾ 堀部 直人²⁾ 石山 拓二³⁾

Experimental Study on Characteristics of Diesel Spray under Small-quantity Injection Condition in an RCEM

Zhichao BAO Naoto HORIBE Takuji ISHIYAMA

In order to clarify the characteristics of sprays with small-quantity injection, optical experiments were conducted using a rapid compression and expansion machine. The shadowgraph imaging technique and Mie scattering method are applied to visualize spray liquid and gaseous phase at the same time and the effects of various injection parameters such as injection mass, injection pressure, and nozzle diameter, etc., on spray characteristics were investigated. Several characteristics specific to small-quantity injection were observed for liquid phase length, spray tail movement and spray cone angle.

Key Words: Diesel Spray, Multiple Injection, Small-quantity Injection, Spray Angle, RCEM

1. はじめに

現在、ディーゼル機関では、多段噴射が活用されている。その利点として、まず、メイン噴射に先立って少量の燃料を噴射するパイロット噴射で事前に燃焼室に高温の混合気を作り着火性を高め、メイン噴射で供給された燃料の着火遅れを短くする。これにより、初期の熱発生率を抑え騒音を低減できる⁽¹⁾。また、アフター噴射ではメイン噴射の後に少量の燃料を噴射することですすの排出が低減する⁽²⁾⁽³⁾。しかし、多段噴射を使ってエンジン性能および排気の最適化を図るとなると、各噴射の噴射時期、噴射量、噴射圧力などのパラメータが多くなり、実測でこれを行うには時間とコストがかかる。そのため現象論的燃焼モデルや三次元 CFD による計算の活用が望まれるが、これらの計算の精度を確かにするために必要な少量噴射の噴霧の混合気形成、発達過程のデータは不足している。そこで、本研究では、噴射率が立ち上がり立ち下がりのみで構成される少量の混合気形成過程を明らかにすることを目的とした。そのために急速圧縮膨張装置を用いて、高温・高圧の雰囲気を作成し、そこに、単噴孔インジェクタを用いて少量噴射を行った。その時の噴霧をシャドウグラフ法により撮影し、その際に Mie 散乱法を併用することで、噴霧の液相と気相を同時に捉えた。撮影したデータをもとに噴霧の液相および気相の先端到達距離などの特性値を算出し、噴射条件と少量噴霧の噴霧発達および混合気形成との関係を調べた。また、噴霧液滴の広がり角の参考値として、噴孔近傍角度を定義し求めた。さらに、空気導入に関連する噴霧広がり角として円錐形で近似した噴霧広がり角度を定義して求め、それぞれの噴射条件における

変化を調査した。

2. 実験装置および方法

本研究では、図 1 に示す急速圧縮膨張装置を用いて実験を行った。この装置は、モータで往復動機関を外部から駆動することで実機関の圧縮、燃焼、膨張の単工程を再現する。ベース機関に 4 サイクル単気筒ディーゼル機関(Yanmar NFD170, 口径 102mm, 行程 105mm, 行程容積 857cc)を用いた、構成部品のうち、シリンダヘッドは独自に設計製作したものを用いた。

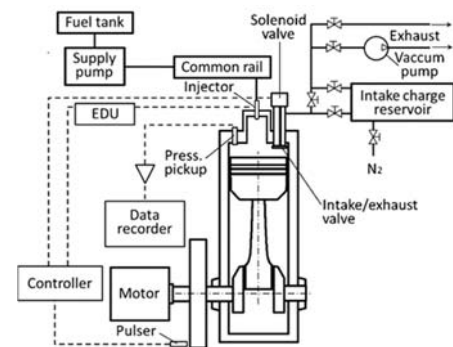


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

本装置はシリンダヘッド内に高さ 40mm, 幅 30mm, 深さ 40mm の概ね直方体の燃焼室を持ち、図 2 に示す通り、三方に石英窓を取り付けた。燃料の噴射はピエゾ駆動単噴孔インジェクタを含むコモンレールシステムを用いた。本研究で対象とした少量噴射の噴射条件と雰囲気条件を表 1 に示した。燃料噴射率は、Zeuch の方法を用いて測定した。

噴霧の可視化方法として、まず、シャドウグラフ法を用いた。点光源からの白色光を凹面鏡で平行光にし、燃焼室に照射した。この光を再び凹面鏡で集光して、高速度カメラ(Photron FASTCAM SA-Z)で撮影することにより、燃焼室内の密度変化

*2017年12月6日第28回内燃機関シンポジウムにおいて発表。

1) ・ 2) ・ 3) 京都大学大学院 エネルギー科学研究科
(〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

を画像の濃淡として捉えた。また、平行光と垂直の方向よりレーザー光(波長 532nm)を入射し、噴霧の液滴による Mie 散乱光を捉えた。撮影速度は 90000fps、露光時間は 10 μ s とした。

撮影された画像の中で Mie 散乱により光っている部分を液相、それ以外のシャドウグラフ法による影を蒸気とみなして噴霧を液相と気相に分離し、噴霧気相先端到達距離 S_{tip} 、液相到達距離 S_{liq} 、液相後端位置 y_{tail} と噴孔近傍角度 θ_N を図 3 に示すように定義した。 θ_N は噴孔から下流へ 6.5mm までの 2 本の噴霧液相境界の近似線が交わる角度と定義した。 y_{tail} は図 4 に示すように、ノズル先端から噴霧後端の距離と定義した。 y_{tail} が下流へ移動することは噴霧後端が希薄化することを意味する。また、図 5 の概略図に示すように、元画像の二値化画像を 1 ピクセルの厚みを持つ円盤の連続として捉え、噴霧の体積を計算した。更に、噴霧をこの体積に等しい円錐と仮定することにより、円錐の頂角を噴霧広がり角度 θ_c と定義した。この時、近似円錐の高さは上で求めた噴霧先端到達距離に等しいとした。

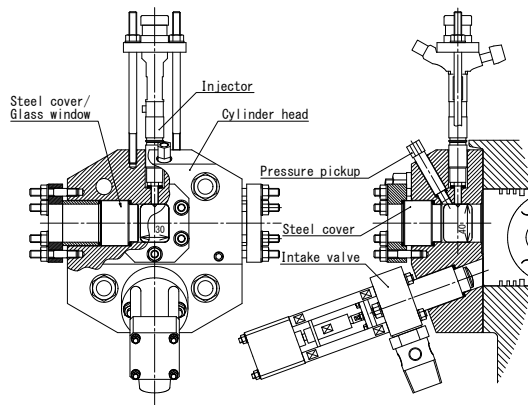


Fig.2 Cross section of rapid compression and expansion machine

Table.1 Injection condition and parameters

Injection pressure	40, 80, 120MPa
Injection mass	0.25, 0.50, 0.80mg
Injector nozzle diameter	0.12, 0.14mm
Ambient pressure	4MPa
Ambient temperature	850K
Injection timing	TDC

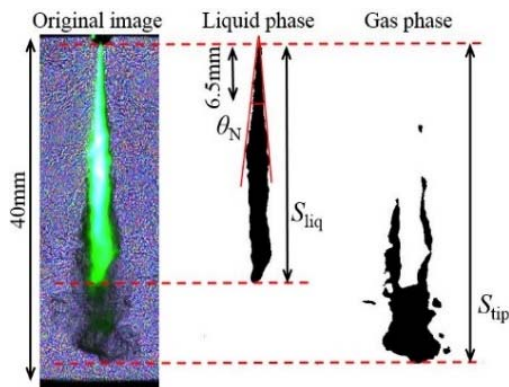


Fig.3 Definition of S_{tip} , S_{liq} , and θ_N

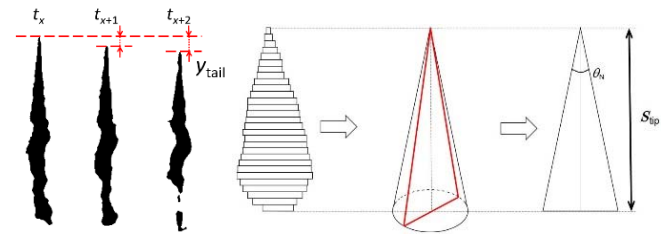


Fig.4 Definition of y_{tail}

Fig.5 Definition of spray cone angle θ_c

3. 実験結果および考察

3.1. 準定常噴霧の特性

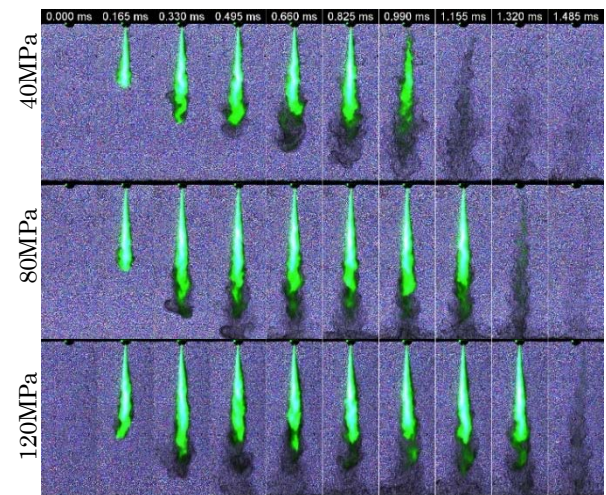


Fig.6 Spray images sequence of quasi-steady injection taken by shadowgraph image method and Mie scattering

少量噴射の噴霧特性を比較する前に、準定常的な噴射率を伴う比較的噴射期間の長い場合の噴霧特性を調査した。噴孔径 $d_N=0.12$ mm, 噴射指令期間 400 μ s を固定条件とし、噴射圧力を 40MPa, 80MPa, 120MPa と変更し噴霧を撮影した。シャドウグラフおよび Mie 散乱画像を図 6 に示す。図 6 から得られた S_{tip} , S_{liq} , y_{tail} を図 7 に示した。図 7 より、噴射圧力の増加とともに噴霧液相到達距離がより早く定常に達する。また、噴霧液相先端は約 5mm の範囲で変動していることがわかるが、定常期間において噴射圧力が噴霧液相先端的平均的な到達距離に与える影響があまり見られなかった。これは他の研究のデータ⁽⁴⁾と一致する。

また、噴孔近傍角度 θ_N を図 8 に示した。80MPa と 120MPa の噴射では、噴射の初期では θ_N は最初大きく、10 度から 12 度に到達する。その後、減少し、6 度から 8 度の間を推移した。40MPa の噴射では、 θ_N が減少する速さが噴射圧力の高い条件と異なり、遅いことがわかる。いずれの噴射圧力でも噴射が終わる直前では θ_N の増加が見られた。これは噴孔内に発生するキャビテーションの影響により、噴霧角が大きくなったと考えられる⁽⁵⁾。

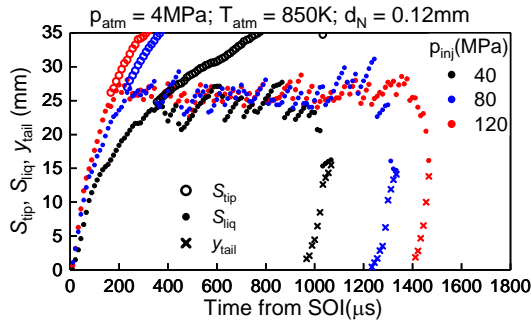


Fig.7 S_{tip} , S_{liq} , y_{tail} of quasi-steady injection with injection pressure of 40, 80, 120MPa

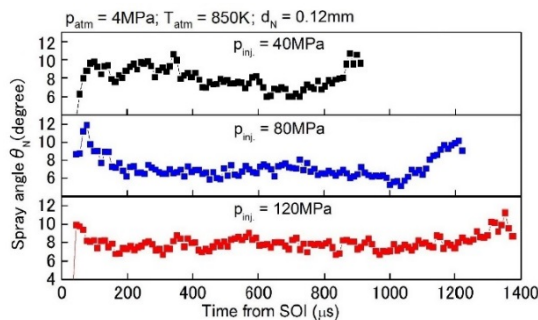


Fig.8 θ_N of quasi-steady injection with injection pressure of 40, 80, 120MPa

3.2. 噴射量が噴霧特性に与える影響

本節では噴射量が噴霧特性に与える影響について考察する。噴射圧力を 80MPa、噴孔径を 0.12mm に固定し、噴射期間を変化させて噴射量を 0.25mg, 0.50mg, 0.80mg とし、噴霧の撮影を行って、 S_{tip} , S_{liq} , y_{tail} , θ_N , θ_c を算出し比較した。

各噴射量での噴射率を図 9 に示す。噴射量 0.25mg では、噴射率のピークが噴射量 0.50mg と 0.80mg に比べて低い。噴射量 0.25mg および 0.50mg の噴射率は、立ち上がり後すぐに低下を始めているが、噴射量 0.80mg の噴射率には準定常期間が見られる。

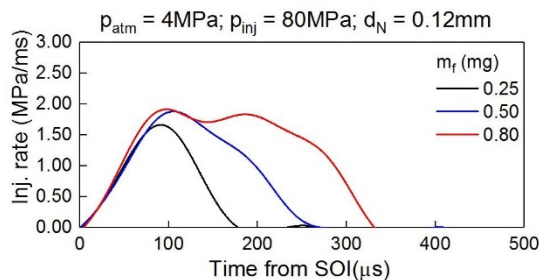


Fig.9 Injection rate shape with various injection mass at injection pressure of 80MPa

噴射量 0.25mg, 0.50mg, 0.80mg での S_{tip} , S_{liq} , y_{tail} を図 10 に示した。噴射量を変更しても、初期の液相先端発達速度に差はなかった。 S_{liq} は噴射が終わると後退し、やがて y_{tail} と合流する。また、噴射量 0.80mg を除いて S_{liq} は準定常噴射で見られたような定常値に達することはない。噴射量 0.25mg では約 200μs ASOI (噴射開始後) から噴霧先端速度が低下し、噴射量

0.50mg および 0.80mg の場合よりも低くなる。

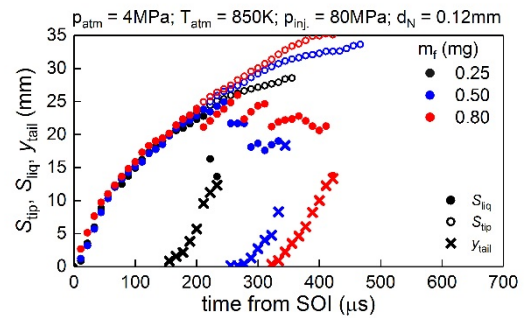


Fig.10 Effect of injection mass on S_{tip} , S_{liq} , and y_{tail} with injection pressure of 80MPa

また、噴霧の後端に注目し、各噴射量の噴射終了時刻からの y_{tail} の発達を図 11 に示した。これによると、噴射量が変わっても噴霧後端の移動速度に大きな違いは見られなかった。以上より噴射量は噴霧液相の初期の先端および後端の発達速度に大きな影響を与えないことが分かる。これは、図 9 の噴射率波形を見るとわかるように、各噴射量の立ち上がりおよび立ち下がりでの波形を示すことによると考えられる。

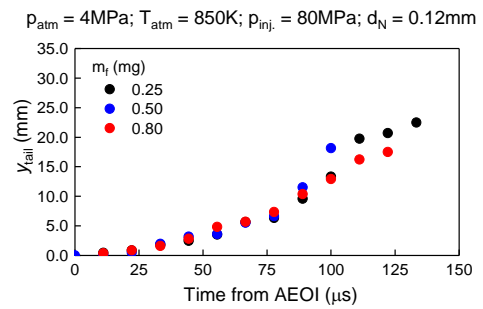


Fig.11 y_{tail} with various injection mass at injection pressure of 80MPa

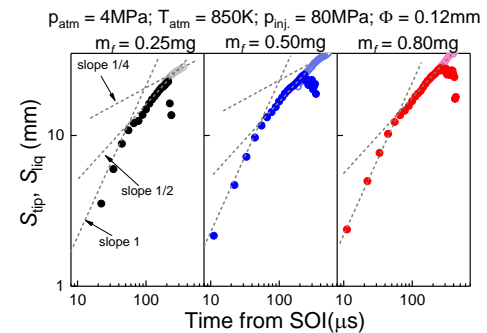


Fig.12 Log-log chart of S_{tip} , S_{liq} with various injection mass at injection pressure of 80MPa

次に、噴霧先端の時間推移をより詳細に調べるため、噴霧先端と時間の関係を両対数表示したグラフを図 12 に示す。 S_{liq} は S_{tip} よりも薄い色でプロットした。噴霧到達距離は t に比例し、その後 $t^{1/2}$ から $t^{1/4}$ 依存へと移り変わっていくことが知られている⁽⁶⁾。本実験では、各噴射条件において噴霧先端は初期に 1 あるいは 1 より大きな傾きで増加し、その後、傾き 1/2 の直線に沿って増加した。さらに噴射量 0.25mg と 0.50mg の条

件では噴射終了後、傾き 1/4 の直線に沿って増加した。傾きが 1 から 1/2 になる時間は $70\mu\text{s}$ から $80\mu\text{s}$ の間で、各噴射量に違いは見られなかった。

噴射量 0.25mg , 0.50mg , 0.80mg における θ_N を図 13 に示す。準定常噴射において、 θ_N は始め大きな値を示し、その後小さくなり、噴射終わりにまた増加する傾向が確認された。噴射量 0.50mg , 0.80mg ではこれと同様の傾向が見られるが、噴射量 0.25mg の噴射では、噴射期間後期に θ_N の増加が見られなかった。その理由についてはなお検討が必要である。

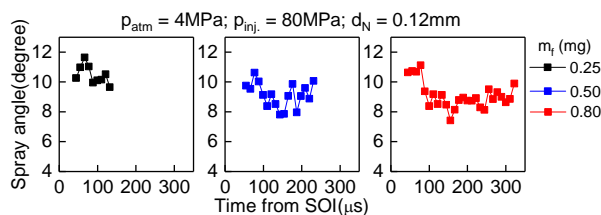


Fig.13 The effect of injection mass on θ_N

更に、 θ_C および θ_N を比較し、その結果を図 14 に示した。 θ_C は概ね θ_N より 5 度ほど大きい。どの噴射量でも、 θ_C は噴射開始後まもなく、一定になるかもしくは徐々に減少したのち、噴射終了と共に減少が急になる。噴射の初期には気相が十分発達せず、 θ_C は液相の発達のみに影響される。そこで、噴霧の蒸発と混合過程を比較するため、図 10 より噴霧の気相部分が十分発達し、液相部分と分離する時期 ($180\mu\text{s}$ ASOI) 以降において各条件の θ_C を比較した。噴射がすでに終了している 0.25mg を除いて、 θ_C の値に違いは見られなかった。

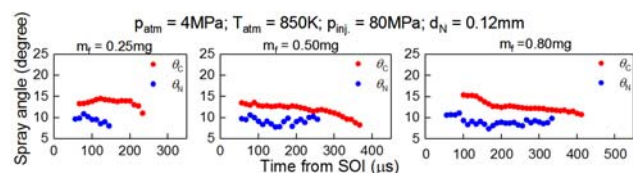


Fig.14 The comparison of θ_C and θ_N with various injection mass at injection pressure of 80 MPa

噴霧の空気導入を考察するために、噴霧体積の時系列変化を図 15 に示した。いずれの噴射量でも、噴射初期における噴霧体積の増加履歴は一致する、また、噴射終了とともに噴霧体積は小さくなる。この時、図 14 によると、 θ_C は減少している。

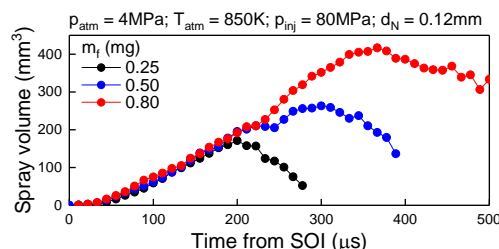


Fig.15 Spray volume with various injection mass at injection pressure of 80 MPa

3.3. 噴射圧力が噴霧特性に与える影響

噴射圧力が噴霧特性に与える影響を明らかにするため、噴

射量を 0.50mg に固定し、噴射圧力を 40MPa , 80MPa , 120MPa と変化させて実験を行った。噴射率波形を図 16 に示す。噴射圧力が高くなるほど噴射期間は短くなっている。また、 80MPa および 120MPa では、噴射率の立ち上がり後すぐに噴射率の低下が始まっているが、噴射圧力 40MPa では、噴射率に準定常期間が見られる。

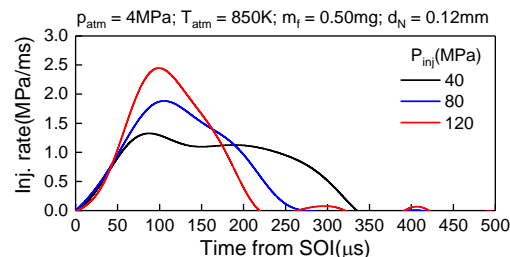


Fig.16 Injection rate shape with various injection pressure at injection mass of 0.50mg

各条件の S_{tip} , S_{liq} , y_{tail} を図 17 に示した。 S_{liq} の最大値には、ほとんど差が見られなかった。ただし、 S_{liq} の発達速度に注目すると、 80MPa と 120MPa では、ほとんど変わらないが、 $50\mu\text{s}$ ASOI から明らかに 40MPa 噴射の S_{liq} のみ発達が遅いことがわかる。また、 $150\mu\text{s}$ ASOI あたりから、 80MPa の噴霧先端発達速度が 120MPa の噴霧より遅くなる。つまり、噴射量が一定な場合、噴射圧力が高い条件では、噴射期間が短く、噴射率の立下りも早い、噴射率の低下が噴霧先端発達に影響を及ぼすには時間が必要であり、噴射圧力が高いほど先端到達距離が長い。また、 y_{tail} に注目し、各噴射圧力での噴霧終わりを時刻 0 として図 18 に示す。図 18 より、噴射圧力が高い条件では、 y_{tail} の増加が速いことが分かる。これは、以下のように説明できる。まず、噴射圧力が大きい場合噴射率の立ち下がりが急になる。その結果、噴射終わりの空気導入が促進され、噴射圧力が低い場合よりもノズル近傍から希薄化が素早く進む⁽⁷⁾。

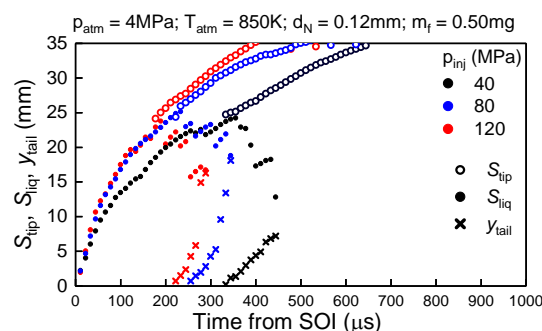


Fig.17 Effect of injection pressure on S_{tip} , S_{liq} , and y_{tail} with injection mass of 0.50mg

各条件における S_{liq} , S_{tip} を対数表示したものを図 19 に示す。噴霧先端は噴射初期には傾きがほぼ 1 の直線に沿って増加し、その後、傾き 1/2 の直線に沿って増加した。各条件での噴霧先端の発達が t から $t^{1/2}$ 比例へ変化する時期に注目すると、噴射圧力 40MPa および 80MPa の条件は、噴射圧力 120MPa の条件と比べると遅い時期に t から $t^{1/2}$ 比例に変化した。噴射圧力

80MPa の条件のみ噴霧先端が噴射が終わった後 $t^{1/4}$ に沿って発達する傾向が観察できた。これは、噴射圧力が高い 120MPa では噴霧先端が早い段階で燃焼室の壁面に到達すること。噴射圧力が低い 40MPa では希薄化により画像から噴霧先端が判断できなくなることが理由である。

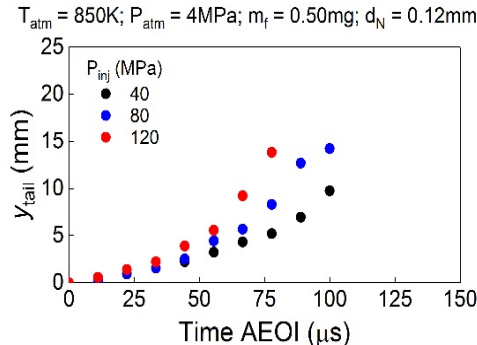


Fig.18 y_{tail} with various injection pressure at injection mass of 0.50mg

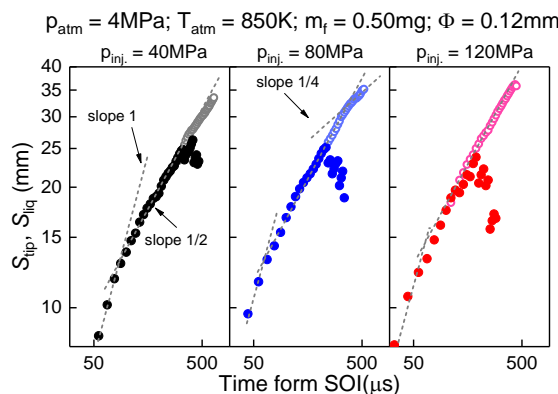


Fig.19 Log-log chart of S_{tip} , S_{liq} with various injection pressure at injection mass of 0.50mg

θ_N の時間変化を計測した結果を図 20 に示した。噴射の立ち上がり区間に注目すると θ_N は、約 10 から 11 度の値を取った。噴射圧力 120MPa と 80MPa の条件では、噴射期間中に約 8 度にまで減少しその後再び増加するのが見られた。一方で、40MPa の噴射では減少が見られず、 θ_N は約 9 度から 10 度の値を取った。

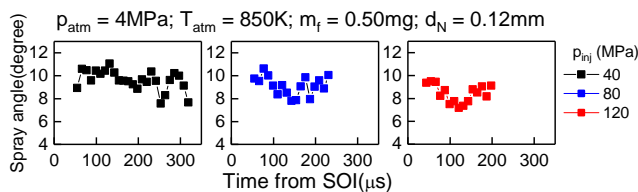


Fig.20 The effect of injection pressure on θ_N

θ_C および θ_N を図 21 に示した。図 21 によると、 θ_C の発達には噴射量を変化させた実験と同様の傾向になった。噴射量を変化させた条件と同じように、それぞれの噴射圧力において噴霧の気相が十分発達した時期からの θ_C の挙動を比較すると、噴射圧力が高くなるにつれて θ_C が減少する傾向が見られた。

噴霧の空気導入を考察するために、各噴射圧力における噴霧体積の時系列変化を図 22 に示した。すべての条件において、

噴射が終了した後も噴霧体積は一定の時間増加し続けた。また、噴射圧力が高いほど噴霧体積の増加が速いことがわかる。更にそれぞれの噴射圧力における噴霧体積ピークに着目すると、噴射圧力が高いほど噴霧体積のピーク値が大きい。つまり、噴射圧力が高い条件では、同噴射量で比較すると噴射終了までの空気導入量が多い。

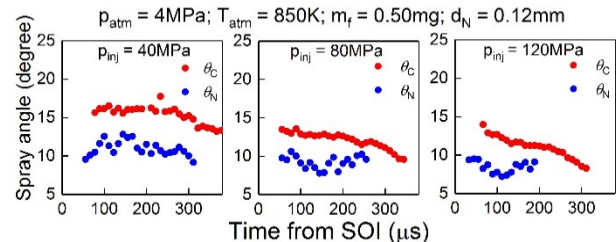


Fig.21 The comparison of θ_C and θ_N with various injection pressure at injection mass of 0.50mg

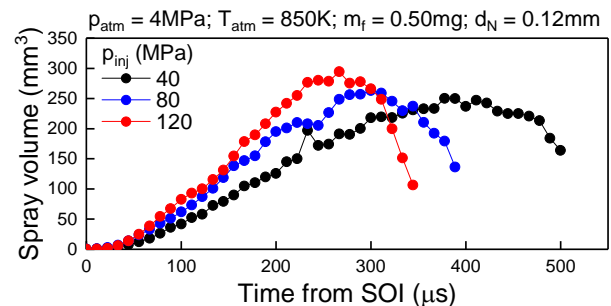


Fig.22 Spray volume with various injection pressure

3.4. 噴孔径が噴霧特性に与える影響

噴孔径が噴霧特性に与える影響を明らかにするため、噴射量 0.50mg、噴射圧力 80MPa において、噴孔径 $d_N=0.12\text{mm}$ と 0.14mm の 2 種類の噴孔径で実験を行った。図 23 に各噴孔径の撮影画像を元に算出した噴霧の S_{tip} , S_{liq} および y_{tail} を示した。また、図 24 に噴射率波形を示した。図 24 を見ると、噴射の初段階の発達は噴孔径の大きさに関係なく、 S_{liq} は同じような発達傾向を示した。しかし、その後噴射率が高い 0.14mm の方が 0.12mm よりも噴霧先端到達距離が大きい。これは以下のように説明できる。噴霧発達の初段階では、噴霧の液滴先端発達速度は噴射圧力に依存するため、圧力が同じ本条件では同じ発達傾向となる。その後、微粒化と蒸発が十分進むと運動量理論が適応でき、これによると先端到達距離は噴孔径の 0.5 乗に比例して発達する⁽⁸⁾。また、噴孔径が大きい噴射では、 S_{liq} の定常値が大きいことがわかる。これは以前の研究で得られた S_{liq} の定常値は噴射の有効噴孔径の大きさに比例する結果⁽⁴⁾と定性的に一致する。

θ_N をの計測結果を図 25 に示す。どちらの噴孔径でも噴射の立ち上がり期間に、大きな値を取る。ただし、噴孔径 0.12mm では約 10 度、 0.14mm では約 13 度と、噴孔径の大きいほうが大きな値を取った。

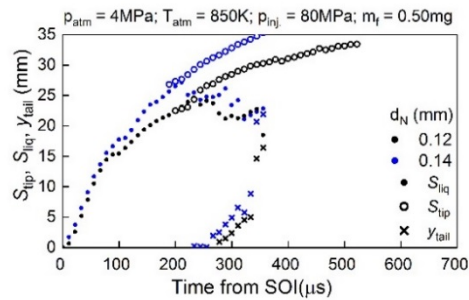


Fig.23 Effect of nozzle diameter to S_{tip} , S_{liq} , and y_{tail} with injection mass 0.50mg and injection pressure 80MPa

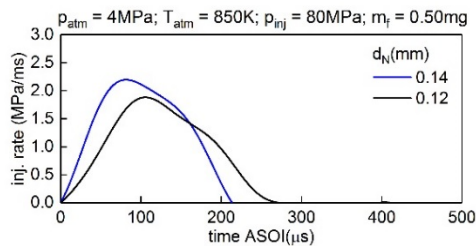


Fig.24 Injection rate shape with nozzle hole diameter of 0.12 and 0.14mm at injection mass 0.50mg and injection pressure 80MPa

θ_c および θ_N を比較し、噴孔径が θ_c に与える影響を調べた。その結果を図26に示す。噴射の初期において、噴孔径が大きい条件では θ_N が大きく、 θ_c も大きい事がわかる。その後、噴射開始からおよそ200 μ s後、噴霧の気相が十分発達した時期においては θ_c の違いは見られなかった。

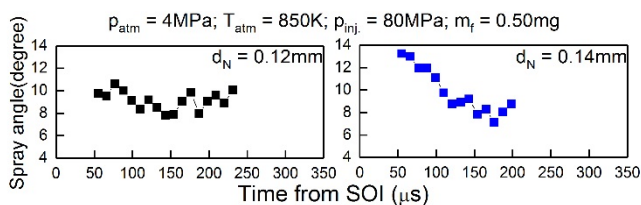


Fig.25 The effect of nozzle hole diameter on θ_N

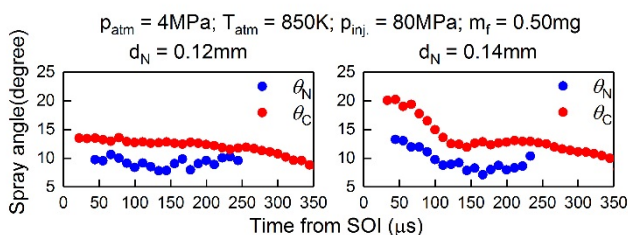


Fig.26 The comparison of θ_c and θ_N with different nozzle hole diameters

4. まとめ

急速圧縮膨張装置を用いて、噴孔径(0.12mm,0.14mm)、噴射量(0.25mg,0.50mg,0.80mg)、噴射圧力(40MPa,80MPa,120MPa)を変化させた実験を行い、シャドウグラフ撮影法とミー散乱法を用いて、少量噴射における蒸発噴霧の特性を調べた。以下にその結果をまとめる。

- (1) 噴射量を変更しても、初期の液相先端発達速度に差はなかったが、噴射量0.80mgを除いて噴霧液相先端到達距離は準定常噴射で見られたような定常値に達することはない。
- (2) 噴霧先端到達距離は、噴射初期は、傾き t の1乗の直線より大きな傾きで増加するが、すぐに傾き t の1乗の直線に沿って発達する。その後、傾き t の1/2乗の直線に沿って発達し、噴射圧力80MPa、噴射量0.25mgと0.50mgの条件では噴射終了後 t の1/4乗に沿って発達する過程が観察された。
- (3) 噴射圧力が等しく、噴射率の立ち下がり速度が同等の場合、噴霧後端の移動速度は同じである。噴射圧力が高い場合、噴射終わりの空気導入が促進され、噴射圧力が低い場合よりも移動速度が大きい。
- (4) 噴孔近傍角度(θ_N)は、噴射率の立ち上がり期間において、ピークの値をとった。その後一旦減少し、噴射終わりにまた上昇する傾向が見られた。また、噴孔径が大きい噴射では、噴射初期の θ_N が大きい。
- (5) 噴射圧力が大きくなるにつれて噴霧拡がり角度(θ_c)が減少する傾向が見られたが、噴射量、噴孔径を変化させても、 θ_c に違いは見られなかった。

5. 謝辞

本研究の実験と画像解析に協力いただいた当時本学学部生野村秋文氏に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Zhang, Long. A study of pilot injection in a DI diesel engine. No. 1999-01-3493. SAE Technical Paper, 1999.
- (2) 小川英之, et al. アフター噴射によるディーゼル燃焼の改善特性. 自動車技術会論文集 Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan 39.1 (2008): 101-106.
- (3) Badami, Marco, Federico Mollo, and D. D. D'amato. Experimental investigation on soot and NOx formation in a DI common rail diesel engine with pilot injection. No. 2001-01-0657. SAE Technical Paper, 2001.
- (4) Payri, R., et al. Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions. Fuel 87.7 (2008): 1165-1176.
- (5) 林朋博, et al. 等倍モデルによるディーゼルノズル内流れと噴霧燃焼の可視化解析 自動車技術会論文集 Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan 43.6 (2012): 1251-1256.
- (6) Musculus, Mark PB. Entrainment waves in decelerating transient turbulent jets. Journal of Fluid Mechanics 638 (2009): 117-140.
- (7) Knox, Benjamin, and Caroline Genzale. Effects of end-of-injection transients on combustion recession in diesel sprays. SAE International Journal of Engines 9.2016-01-0745 (2016): 932-949.
- (8) 和栗雄太郎, et al. ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究 日本機械学会論文集 Vol.25 (1959) No.156 820-826